

## Études de durabilité

---

Béton renforcé par fibres de carbone (CFRC) avec barres ou treillis

### 1. Vue d'ensemble de la durabilité du CFRC

Le béton renforcé par fibres de carbone (CFRC), utilisant des barres d'armature ou des treillis, offre une résistance à la corrosion nettement supérieure à celle de l'acier, permettant potentiellement d'atteindre une durée de vie supérieure à 100 ans dans des environnements agressifs (milieu marin, environnement alcalin, etc.).

La durabilité dépend principalement :

- de l'interface fibre-matrice,
- des facteurs environnementaux (alcalinité, humidité, température, UV),
- des sollicitations mécaniques (fluage, fatigue).

#### Principaux mécanismes de dégradation

**Hydrolyse et plastification :** L'humidité diffuse dans la matrice (par exemple vinylester ou époxy), ce qui réduit la  $T_g$  (température de transition vitreuse) et la rigidité.

**Attaque alcaline :** Le pH élevé de l'eau interstitielle du béton (~12-13) peut dégrader les fibres si la matrice protectrice est altérée.

**Effets synergiques :** Les combinaisons d'actions (ex. humidité + charge mécanique) accélèrent la dégradation davantage que les effets pris isolément.

**La durabilité est généralement modélisée via la cinétique d'Arrhenius :** la vitesse de dégradation double approximativement pour chaque augmentation de 10°C, ce qui permet d'extrapoler les résultats d'essais accélérés.

En conditions réelles, la dégradation est souvent plus lente que celle prédite en laboratoire, en raison de l'effet protecteur de l'enrobage béton.

### 2. Données de performance à long terme

Les données à long terme (>10 ans) restent limitées mais sont en croissance, principalement issues d'inspections de terrain et de programmes de suivi.

## Applications réelles (10-20 ans d'exposition)

En Amérique du Nord, des barres GFRP/CFRP utilisées dans des ponts (ex. Pont de Val-Alain, Canada, 2007) n'ont montré aucune dégradation significative après plus de 10 ans :

- Conservation de la résistance en traction >84 % en béton humide à température ambiante (20-40°C)
- Aucune corrosion
- Perte d'adhérence minimale

En environnement marin (ex. Burj Al Arab, Dubaï, 2015), les armatures CFRP ont conservé leur intégrité, avec une durée de vie projetée de 100 ans et aucune pathologie liée aux chlorures.

## Durée de vie prédite

Selon les modèles d'Arrhenius :

- Les barres CFRP conservent 80-90 % de leur résistance en traction après 50 à 100 ans à 20°C.
- Les treillis utilisés dans des sols industriels présentent une durabilité projetée de 30 à 50 ans avec fissuration minimale.

## Résistance au fluage-rupture

- Les barres CFRP peuvent soutenir 70-85 % de leur résistance ultime pendant 50 ans.
- Les données de ponts canadiens montrent une augmentation de déformation <5 % après 10 ans sous charges de service.

## Vérification critique

La majorité des données concerne le GFRP (moins résistant que le CFRP).

Les études spécifiques au CFRP à très long terme sont encore rares, mais les modèles prévoient des performances supérieures grâce à l'inertie chimique du carbone.

## 3. Essais de vieillissement accéléré

Les essais accélérés simulent plusieurs décennies en quelques mois en augmentant la température, le pH ou la charge.

### Protocoles courants :

- Immersion en solution alcaline (pH 12-13)
- Températures de 40 à 60°C
- Normes ASTM D7705 ou ISO 10406-1

## Exposition alcaline

Des essais sur barres GFRP (matrice vinylester) en solution pH 13,5 à 20-60°C pendant 240 jours montrent :

- Perte de résistance en traction : 0 à 42 %  
(valeur maximale à 60°C en immersion directe)
- Résistance d'adhérence conservée à 90-120 %
- Tg stable (~100°C)
- Pas d'hydrolyse significative de la matrice

## Extrapolation Arrhenius :

- 40 % de perte en ~2,5 ans à 20°C en immersion alcaline directe
- Mais en conditions réalistes (armature noyée dans le béton), perte <10 %

→ Le béton joue un rôle protecteur déterminant.

## Couplage humidité / température

Les recommandations ACI indiquent :

- Perte de résistance de 0 à 20 % après 1000-3000 heures en solution saline/alcaline à 40-60°C.
- Fluage : diminution de résistance de 5 à 8 % par décade logarithmique.
- Exigence recommandée : >75 % de résistance résiduelle après 1000 h à 60°C (pH 12,7).

## Fatigue + vieillissement

- 10<sup>6</sup> cycles à 40 % de la résistance ultime en milieu alcalin : perte de 0 à 10 % pour le CFRP.
- Avec humidité combinée : réduction pouvant atteindre 20 %.

Les essais ont tendance à surestimer la dégradation (immersion directe vs. conditions réelles).

Avec des facteurs d'accélération réalistes (×10 à 40°C), la rétention de résistance à 50 ans dépasse généralement 80 % pour barres et treillis CFRP.

## 4. Résultats en exposition environnementale

Les essais couvrent : milieu alcalin, humidité, UV, sel, température – particulièrement critiques pour ponts et structures marines.

## Milieu alcalin

- Perte de 0 à 10 % après 1-2 ans simulés.
- Aucune dégradation observée après 10 ans en béton réel.

## Humidité / UV / sel

- Rétention de 80 à 100 % après 3000 heures UV + humidité.
- Milieu salin : perte de 0 à 15 %.
- Tests d'hygiène : absence de développement microbien (adapté aux environnements hydrauliques).

## Température / incendie

- $T_g > 100^\circ\text{C}$  → stabilité jusqu'à  $80^\circ\text{C}$  en service.
- En cas d'incendie :

50 à 65 % de résistance conservée à  $300\text{--}500^\circ\text{C}$  (ancrage correct).

## Exposition réelle

En environnements agressifs (ponts soumis au sel de déverglage, silos, écrans antibruit) :

- Aucun phénomène de fissuration ou corrosion après 5-10 ans.
- Réduction du volume de béton → réduction des émissions de  $\text{CO}_2$  → amélioration de la durabilité globale.

## 5. Recommandations et lacunes

### Facteurs de conception

- Utiliser un coefficient environnemental  $CE = 0,9$  pour CFRP exposé.
- Privilégier les matrices vinylester pour la résistance alcaline.

### Axes de progrès

- Développer des essais hybrides (vieillessement + charge mécanique).
- Intégrer des systèmes de monitoring en temps réel (fibres optiques).
- Accumuler des données de terrain sur 20-30 ans pour affiner les modèles prédictifs.

### Analyse réaliste

Les perspectives sont très favorables pour applications marines et infrastructures.

Cependant, la validation complète à l'échelle de 100 ans nécessitera davantage de données de terrain sur plusieurs décennies.